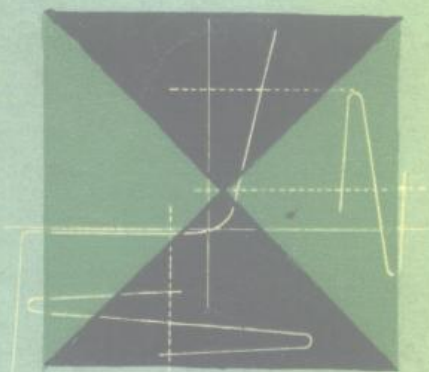


微波半导体 控制电路

[美] J.F. 怀特 著



科学出版社

微波半导体控制电路

〔美〕J. F. 怀特 著

王晦光 黎安尧 译

张 伦 校

科 学 出 版 社

1 9 8 3

内 容 简 介

本书是论述微波半导体控制电路的一本专著。书中系统地阐述了 PIN 二极管以及变容二极管的工作原理、数学分析法和性能,采用 PIN 器件作为控制元件的限幅器、双工器、开关、衰减器、移相器(侧重于数字式移相器)等微波控制电路的工作原理和计算机辅助设计方法。在讲解设计方法时,均用具体的工程设计例子予以说明,并给出了理论计算的性能和实际测量的结果。全书共分九章,内容包括 PN 结; PIN 二极管及其微波工作原理;实际的 PIN 二极管;晶体管双态驱动器;控制网络的基本极限;数学方法与计算机辅助设计;限幅器和双工器;开关和衰减器;移相器和延时网络;书末有附录及问题答案。

本书适合中级以上工程技术人员阅读,可作为有关科研设计人员的参考用书,也可供高等院校有关专业的师生参阅。

J. F. White

SEMICONDUCTOR CONTROL

Artech House, Inc., 1977

微波半导体控制电路

[美] J. F. 怀特 著

王晦光 黎安尧 译

张 伦 校

责任编辑 魏 玲

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1983 年 10 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/32
1983 年 10 月第一次印刷 印张: 19 5/8
印数: 0001—6,800 字数: 445,000

统一书号: 15031 · 530

本社书号: 3284 · 15—7

定 价: 3.00 元

译者序

目前应用的微波控制电路分为半导体控制电路和铁氧体控制电路两类。因为前者要求的控制功率小,且具有响应速度快以及体积小和重量轻等一系列优点,所以在相控阵雷达、微波通信、卫星通信和微波测量技术中应用最为广泛。

本书专论微波半导体控制电路。作者长期从事这方面的研制工作,经验丰富,擅长于发展大功率的 PIN 器件控制电路,曾因“出色地将微波理论与技术用于发展各种相控阵雷达所需的大功率 PIN 二极管移相器”而获得 1975 年美国电气与电子工程师学会 (IEEE) 颁发的微波应用奖*。

本书注重工程设计的实际问题,突出阐述了采用电子计算机进行设计的方法,并用具体的设计例子来加以说明,给出了理论计算的性能曲线与实际测量结果,可供我们借鉴。此外,由于 PIN 控制器件的功率容量不及铁氧体控制器件大,故书中还介绍了提高整个控制电路功率容量的若干具体方法。与此同时,书中亦很重视基本理论分析和物理概念的讲解,所用的数学工具大体上限于矩阵代数的范围;在讲解计算机辅助设计之前,也用一些篇幅对 FORTRAN IV 语言作了扼要的介绍。因此本书作到了循序渐进,由浅入深,这便于具有微波技术和矩阵代数以及网络分析等方面基础知识的、中级以上的技术人员阅读;甚至对那些希望初步了解半导体和半导体控制电路的基本知识的读者来说,也可作为一本入门的读物。

* 见 1975 IEEE G-MTT Symposium Digest.

原书的不足之处是笔误和印刷错误较多，全书有若干处在技术概念上尚欠明确甚至失误。考虑到初稿系由作者的几个助手分头撰写的，最后的协调、统一工作又稍欠细致，出现上述不足也就不足为奇。为此，我们采取了以下措施：对于明显的笔误或排印错误，译文中均直接改正而不再加译注；对于技术性的失误，改正后并加译注说明；在若干较为重要之处，原文照译，再另加译注订正，供读者鉴别。此外，为了便于阅读和理解，在有些地方我们还加了技术解释性的译注，供读者参考。吴必礼同志参加了本书第二、三、五章及第六章中的一部分初稿的翻译工作。

在翻译过程中，得到了张世箕教授的热情指导，对此，我们表示诚挚的谢意。

由于译者水平有限，不妥甚至谬误之处在所难免，欢迎读者批评指正。

译者

于成都电讯工程学院二系

前 言

约瑟夫·弗·怀特 (Joseph.F.White) 对微波半导体材料、控制二极管及其电路的应用等方面都曾有所研究, 并曾经从事过这些方面的工作和教学. 在该领域, 他有坚实的数理基础. 特别重要的是, 他具有工程师的素养, 善于把基本知识同经验和独创性结合起来, 在要求的性能与研制经费、生产成本诸种因素的限制之下作出符合实际的设计. 由于他有教学经验, 写过很多篇学术论文, 并作过多次讲演, 因而形成了叙述清晰、组织得当的文风, 使本书无论作为自学课本、参考书籍或设计手册均甚方便.

怀特博士认为, 一个这方面的工程师必须通晓半导体物理学、具备微波电路理论的全面知识, 至少应粗通晶体管驱动器, 并且能够在计算机终端上检验和改进微波电路, 如此方能胜任微波半导体控制元件方面的工作, 作出富有创造性的时新设计. 本书前半部分大体上都恰如其分地编进了这些内容. 后半部分论述开关、衰减器、限幅器、双工器和移相器设计的一般问题和具体问题, 并附有从他本人和其他一些人的经验中挑选出来的许多例子.

特别重要的是“数学方法和计算机辅助设计”一章. 这一章的内容对于一切从事微波电路工作的人员 (不管电路中包含半导体元件与否) 都是不可缺少的, 尤其是那些正在寻找一本计算机编程入门的好书的工程技术人员将会发现用本书可以打好基础. 因为对于想学会微波电路计算机辅助设计编程技巧的人来说, 论述 FORTRAN 语言的一些典型书籍和说

明书显得太过于一般化,过于错综复杂,因而太容易把人弄糊涂了。怀特博士提供了分时制 FORTRAN IV 语言编程的必具知识。从基础知识开始,包括整型变量、实型变量和复型变量、算符、实函数、复函数,子程序,简单的 READ (读)语句、WRITE (写)语句和 FORMAT (格式)语句以及程序流图等等。他列举了很多程序清单作为例子,从简单的子程序开始,然后进入有耗传输线的导抗变换,复数 $ABCD$ 矩阵的乘法、频响特性计算等等的子程序。最后给出微波电路中常见的级联二端口网络基本单元电路的一般网络分析程序流图和程序清单。他还从自己的终端机上复制了许多打印输出的例子来说明 WRITE 语句和 FORMAT 语句,使它们的意义不致于含混不清。

我相信,别的微波工程师会和我一道鉴赏这本书的广泛实用价值,并为有关微波电路(无论采用半导体元件与否)的诸方面问题而经常查阅本书。

S. B. 科 恩

1977 年 1 月于加利福尼亚州塔尔扎纳

原 序

锡沃多尔·萨德 (Theodore Saad) 建议我撰写本书, 我感谢他的建议。

本书经过微波联合公司 (Microwave Associates, Inc.) 的慷慨合作而出版, 这是他们具有行家气派的明证。

克莱尔·阿耳特里奥 (Claire Alterio) 润饰了大部分手稿, 并协助尼耳·维塔尔 (Neal Vitale) 作了手稿的协调工作。头一章的手稿很早就着手撰写了, 这一章是由简·比兰德 (Jan. Beland) 和依林诺尔·沃耳什 (Eleanor Walsh) 准备的。也许只有试图著书的人才能理解我对他们的熟练技巧、热情和坚持不懈完成清稿的精神感激之深。

当考虑可供列选的内容时, 我把挑选出来的部分按其相对的重要程度列出如下:

1. 计算机辅助设计的作用和方法;
2. 从微波工程技术人员的角度描述半导体;
3. PIN 二极管的直接指标;
4. 确定 PIN 二极管额定功率的方法;
5. 微波数学便览, 包括: FORTRAN IV 语言, 矩阵代数, 奇-偶模分析法, 确定波导的阻抗(借助于格林函数), 三端口网络理论的新发展等等;
6. 阐述半导体二极管开关、双工器和移相器的基本极限, 电路技术和实际结果的教材;
7. 公式、常数和设计图表汇编。

上述目标达到得如何, 只有读者才能作出评论。我希望

本书被证实是很有用处的,以致有理由修订再版。因此,特别欢迎对作者提出建议、批评和指正。

约瑟夫·弗·怀特

1976 年 11 月于马萨诸塞州列克星顿

引 言

这本书打算作为半导体控制电路设计和分析的入门教材和参考书,因此写得可供两种不同程度的读者阅读。

对于只希望有个一般性了解的读者,可以泛读本书,从中获得有关这个课题的入门知识。譬如,有人可能关心这样一些问题:什么是半导体,载流子寿命是如何确定的,寿命为什么重要,以及它会影响电路的哪些性能。从电路的角度来看,有人可能想弄清楚开关、双工器或移相器是怎样工作的,对这些器件需要提出什么样的指标。这种阅读只要求读者对微波领域有一般的工作上的了解即可。

对于希望达到设计水平的读者,可从中搜集到足够的资料,以便把握半导体控制方面的一个或多个细目的最高水平。因为这既是对一个真正要求解决的应用问题所有各种处理方法进行分析之需要,也是发展现有技术,以达到前所未有的性能之要求。本书为这类读者而编进了通晓复杂电路分析方法所必须的有关题材之最基本的说明。由于大部分微波分析方法(包括史密斯圆图的用法在内)已直接在正文或附录中进行了推导,所以读者具有电气工程学士或物理学士程度的基础就够了。

第一至第三章介绍半导体本身,引出半导体的物理学原理,PN结,整流作用,PIN二极管以及一些影响到微波性能的特性等等。对于掺杂、空穴载流子和电子载流子、寿命、迁移率、电荷、穿通、击穿、耗尽、 $C(V)$ 特性、介质弛豫频率、通过电荷控制模型来确定的微波阻抗、渡越时间、微波击穿、寄生电

抗、热时间常数模型等等概念均下了定义并举有例子说明。以这种介绍性的处理阐述了半导体工作当中从物理的推理以及从测量的角度得出的定义和方法。这些，都是设计人员必须熟悉的知识。这部分叙述以介绍现有的典型二极管的数据而告终。

在讨论器件时往往被忽视的一些密切有关的内容受到了特别的注意。第四章专门叙述 PIN 器件驱动器，定义了平衡的和非平衡的 TTL 电路，指出了如何选择二极管和驱动器以提高开关速度，还描述了测量方法，内附故障探测器 (BITE)、脉冲泄漏的考虑和互补开关的作用原理。

第五章以三端口网络的一般特性为基础，导出了控制电路的基本极限。功率和插入损耗的关系式不仅对控制电路有用，而且它们的推导过程还表明实际使用复变函数理论和阻抗矩阵来确立电路的普遍性结论。这在实践当中是很重要的。

没有任何一个科技领域比得上微波把大门对数学的分析敞得更开了。最近二十年之前，几乎所有的科学计算都是用手算去完成的；而今，这类工作差不多都是由(或者能够由)计算机来进行的。前面一种方法使物理概念较为清晰，而后面一种方法的计算速度，效率和精确度都更高。有经验的科学工作者和工程技术人员都懂得：对每一种计算方法来说，行之有效的数学工具是不同的。

第六章讲数学方法。这一章用电气工程技术人員或物理学工作者易懂的语言介绍了矩阵代数、附有关于矩阵的一些定义和大多数电路所需要的函数程序库；通过对性能奇妙的“返波耦合器”的计算，说明奇-偶模分析方法；FORTRAN IV 语言编程方法(因为它能直接运算复数，所以对微波工程最为实用)；以及实现人机对话性的计算机微波分析程序的步骤，其

中包括能够分析一般双端口网络的完整程序例子。这个程序随后便一直用于本书余下部分的大多数电路分析的例子中。

最后三章叙述半导体控制电路设计的理论与实践。第七章——“限幅器和双工器”。描述了因微波频率和半导体二极管的特性而引起的非线性限幅作用，还详细介绍了采用体效应半导体产生的雪崩限幅效应。波导二极管限幅电路的计算是以便于说明格林函数在波导中怎样应用这样一种方式进行的。体效应元件的分析表明第五章导出的三端口网络的一般特性能够怎样去加以应用。给出了同轴线、波导和微带集成电路限幅器的一些实用的具体设计。这些例子说明了采用固定电容、固定电感或分布电容和分布电感来抵消 PIN 二极管和体效应二极管寄生电抗的调谐方法及其显著效果。设计资料是通用曲线的形式给出的，以便于最后确定器件的工作频率，损耗和隔离度极限。

第八章——“开关和衰减器”。阐述了半导体元件可以怎样嵌入滤波器，以使滤波器理论的大部分内容均可用于控制电路的设计。倍频程大功率开关的一些实际结果不仅论证了利用滤波器理论进行设计的方法，而且还证明了二极管之间的“四分之一波长间隔”和串联参差调谐时增大隔离带宽是很有效的。在开关电路技术的论述中，包括了工作频率从 0.5—18 千兆赫的波导、带状线、同轴线及微带线等电路形式。在这些例子中，既用了单个封装的梁式引线二极管，也用了窗式体效应器件，借以说明可以采用各式各样的半导体器件。

第九章——“移相器”。全面地分析了采用转接线段、加载线段、集总元件和反射式电路构成的数字式移相器，并附有几个 0.4—15 千兆赫的实例；指出了增加带宽和提高功率容量的技术；叙述了连续式移相器，包括推导出每分贝损耗的最大相移，非线性功率极限和变容二极管的选择。

附录 A 至 J 包括有：计算各种传输线和定向耦合器特性的图表、计算机程序；偏置电路与直流回路的频响特性、材料的特性、常用的常数和公式以及史密斯圆图的原理和用法。

目 录

译者序

前言

原序

引言

第一章	PN 结	1
1.1	了解二极管低频特性的必要性	1
1.2	半导体硅	3
1.3	PN 结耗尽区	8
1.4	结电位	14
1.5	扩散电流和漂移电流	15
1.6	整流作用和伏-安特性	20
1.7	耗尽区宽度的调制——耗尽区的 $C(V)$ 特性	26
1.8	反向电压击穿	36
	参考文献	39
	问题	39
第二章	PIN 二极管及其微波工作原理	41
2.1	PIN 二极管——PN 结的发展	41
2.2	微波等效电路	51
2.3	射频功率极限	85
	参考文献	93
	问题	94
第三章	实际的 PIN 二极管	95
3.1	基本参数——I 区宽度与 I 区面积	95
3.2	目前的典型 PIN 二极管的性能参数表	97

3.3 特性参数的定义	97
参考文献	119
问题	120
第四章 晶体管双态驱动器	122
4.1 驱动器的必具功能	122
4.2 驱动器作为逻辑信号与电源之间的缓冲级 (TTL 的兼容性)	123
4.3 开关速度	131
4.4 增强型大功率反向偏置泄放电流源	141
4.5 故障探测电路	143
4.6 互补驱动器对	146
参考文献	148
问题	148
第五章 控制网络的基本极限	149
5.1 引言	149
5.2 损耗(或隔离度)的简单公式	150
5.3 单刀单掷开关的一般三端口等效电路	154
5.4 开关极限	159
5.5 双工极限	168
5.6 相移极限	173
5.7 总结	181
参考文献	182
问题	182
第六章 数学方法与计算机辅助设计	184
6.1 引言	184
6.2 计算机辅助设计的数学分析方法	190
6.3 计算机 FORTRAN 语言程序的编写	218
参考文献	259
问题	260
第七章 限幅器和双工器	262

7.1	实际电路设计问题简介	262
7.2	限幅器的功能	263
7.3	同轴线型双工器	276
7.4	高频波导限幅器	285
7.5	集成电路型限幅器	298
7.6	体效应限幅器	313
	参考文献	331
第八章	开关和衰减器	333
8.1	宽带同轴开关	333
8.2	同轴线型大功率开关	372
8.3	开关双工器 (Switched Duplexers)	380
8.4	波导开关	382
8.5	带状线开关	385
8.6	微带开关	389
8.7	体效应开关	397
	参考文献	411
第九章	移相器和延时网络	412
9.1	引言	412
9.2	换接线段式移相器	414
9.3	传输式移相器	425
9.4	反射式移相器	466
9.5	谢夫曼 (Schifman) 移相器	511
9.6	连续式移相器	517
	参考文献	530
	问题答案	533
	附录	538
A.	一些常用的常数和公式	538
B.	材料特性	542
C.	热阻的计算	549
D.	同轴线	554

E. 微带	560
F. 带状线	566
G. 波导	570
H. 带状线返波混合耦合器	574
I. 偏置隔直电路与偏置回线	576
J. 史密斯圆图	580
索引	597